Das Messen von Verlustwinkeln von Gläsern bei Frequenzen von 30000 kHz bis 15000 kHz ⟨λ = 10,0 m bis 20,0 m⟩ und Temperaturen von 25° C bis 300° C

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

genehmigt

von der Philosophischen Fakultät der
Friedrich-Wilhelms-Universität zu Berlin

Von

WERNER PETERSEN

aus Flensburg

Tag der mündlichen Prüfung: 27. Juni 1935
Tag der Promotion: 16. Oktober 1935

Druck: Doktordruck — Graphisches Institut Paul Funk,
Berlin SW 68, Friedrichstr. 231.

370

Referenten: Prof. Dr. A. Wehnelt
Prof. Dr. E. Schumann

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Inhaltsübersicht.

Seite

I. Einleitung und Aufgabe der vorliegenden Arbeit 5

II. Zusammensetzung und Eigenschaften der Gläser 6

III. Messung von dielektrischen Verlusten von Gläsern (Osram-Materialien) bei den Frequenzen 30 000 kHz bis 15 000 kHz und den Temperaturen von 25° C bis 300° C 9

1. Das Wesen und die Entstehung der dielektrischen Verluste . 10

2. Die Auswahl der Methode und der Aufbau der Meßanordnung 12

a) Die Beschreibung des Senders 13

b) Der Aufbau der Meßanordnung 14

1. Die Induktionsspulen L_2, L_3 und L_4 15

2. Die Vergleichswiderstände (Zusatzwiderstände) . . . 16

3. Der Abstimmkondensator C_N 16

4. Bau des Meßkondensators C_M und des ihn umgebenden Ofens 17

5. Die Meßplatten 22

c) Die Eichung des Meßkreises, die Messung der Größen R, ω, C und die Messung der Temperatur 22

1. Die Eichung des Meßkreises 22

2. Die Bestimmung von R, ω und C 24

3. Die Messung der Temperatur 26

3. Allgemeines über den Messungsverlauf 27

IV. Zusammenfassung und Gesamtergebnis 29

V. Meßergebnisse 29

VI. Schrifttum 40

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41550822_0159

I. Einleitung und Aufgabe der vorliegenden Arbeit.

Mit der Entwicklung des Gebietes der kurzen und der sehr kurzen Wellen in der Hochfrequenztechnik entsteht immer mehr das Bedürfnis, neben verlustarmen keramischen Materialien auch verlustarme Gläser zu besitzen. Diese Gläser werden in der Hochfrequenztechnik wohl vornehmlich zum Bau von Röhren und von Isolierkörpern aller Art verwendet.

Die Kenntnis der dielektrischen Verluste eines Materials bei seiner Verwendung als Isolierstoff ist in der Hochfrequenztechnik mit von ausschlaggebender Bedeutung. Je kleiner die dielektrischen Verluste des betreffenden Materials sind, um so brauchbarer ist es. Die Größen der dielektrischen Verluste hängen von der chemischen Zusammensetzung des Stoffes ab. Bei sehr homogenen Dielektrika nehmen sie nur geringe Werte an. Je inhomogener das Dielektrikum wird, um so größer werden auch die Verluste.

Wegen der großen Temperaturen, denen z. B. besonders die Röhren vielfach, je nach ihrer Verwendung, unterworfen sind, ist es wichtig, nicht nur die Verluste eines Materials bei Zimmertemperatur sondern auch bei höheren Temperaturen zu kennen. Über solche Temperaturmessungen von dielektrischen Verlusten von Gläsern liegen jedoch bisher verhältnismäßig nur wenige Ergebnisse vor. Die Aufgabe der vorliegenden Arbeit ist es daher, zur Kenntnis des Verhaltens von dielektrischen Verlusten von Gläsern bei höheren Temperaturen beizutragen.

Die ersten Messungen solcher dielektrischen Verluste bei Hochfrequenz wurden vor ungefähr 25 Jahren ausgeführt. Es sind hier besonders die Arbeiten von K. W. Wagner und Wertheimer, von Giebe und Zickner, von Tank und von Cohn zu erwähnen. In weitem zeitlichen Abstand folgen dann vor allem die Untersuchungen von Möller, Schott, Offermann, Keller und von Rohde-Schwarz-Schlegelmilch. Die meisten erschienenen Arbeiten befassen sich mit der Messung der dielektrischen Verluste in Abhängigkeit von der Frequenz bei Zimmertemperatur. Nur Cohn, 1911, Schott, 1921 und Möller, 1925/26, haben sich mit Messungen bei verschiedenen Temperaturen beschäftigt. Der damaligen Entwicklung entsprechend fanden die Messungen meistenteils bei niedrigen und mittleren Frequenzen statt. Seitdem eroberte sich die Technik jedoch immer mehr das Gebiet der hohen und höchsten Frequenzen.

Meine Aufgabe war es nun, auf diesem zuletzt genannten Gebiet bei einer Reihe von Gläsern Messungen der dielektrischen Verluste auszuführen, und zwar bei Temperaturen von 25° bis 300° C und bei Frequenzen von 30 000 kHz ($\lambda = 10{,}0$ m) bis 15 000 kHz ($\lambda = 20{,}0$ m).

II. Zusammensetzung und Eigenschaften der Gläser.

Alle Eigenschaften der Gläser hängen von der chemischen Zusammensetzung ab. Unter Glas versteht man normalerweise einfache oder komplexe, durch Unterkühlung amorph erstarrte Schmelzen von Calzium- und Alkalisilikatgemengen, zu denen häufig zur Erzielung besonderer chemischer und physikalischer Eigenschaften noch geringe Mengen anderer chemischer Substanzen gegeben werden. Das Glas ist also keine chemische Verbindung, sondern muß als eine als Gemisch amorph erstarrte Flüssigkeit angesehen werden. Konstitutionsformeln können infolgedessen auch nicht aufgestellt werden. Beste Sorten nähern sich in ihrer hauptsächlichen Zusammensetzung der Formel

$$6\,SiO_2\,(Na_2O,\,K_2O)\,CaO.$$

In der Regel setzen sich die technischen Gläser aus etwa 60 bis 80 % SiO_2, 5 bis 20 % Alkali, 5 bis 15 % Erdalkali bzw. ZnO zusammen. In Spezialgläsern treten dazu noch vielfach Gehalte an Tonerde in Höhe von 3 bis 5 %, an Borsäure bis zu 15 %, an Bariumoxyd bis 40 % und an Bleioxyd bis zu 80 % auf. So enthalten die für die Hochfrequenz wichtigen Gläser, wie z. B. das gut isolierende

Bleikristallglas (Röhrenglas) etwa: 56,1 % SiO_2, 31,1 % PbO, 9,2 % K_2O und 3,5 % Na_2O;

das gegen Bruch- und Temperaturänderungen sehr widerstandsfähige

Amerikanische Pyrex-Glas etwa: 80,0 % SiO_2, 12,0 % H_3BO_3 (entwässerter Borax), 1,0 % B_2O_3 und 7,0 % $H_4Al_2Si_2O_9$ (Kaolin, Porzellanerde); das

Thüringer Apparate-Glas etwa: 69,56 % SiO_2, 2,44 % Al_2O_3, Fe_2O_3, 7,36 % CaO, 15,95 % Na_2O und 3,65 % K_2O;

Jenaer Geräteglas etwa: 74,5 % SiO_2, 4,6 % B_2O_3, 3,9 % BaO, 8,5 % Al_2O_3, 0,7 % CaO, 0,1 % MgO und 7,7 % Na_2O; und das sogenannte

Thermometerglas etwa: 67,0 % SiO_2, 2,0 % B_2O_3, 14,0 % Na_2O, 7,0 % CaO, 7,0 % ZnO und 2,5 % Al_2O_3; und

Quarzglas: 100 % SiO_2 (ist die überschmolzene Form des reinen Siliziumdioxyds. Ist völlig unempfindlich und kann glühend in kaltes Wasser getaucht werden, ohne daß es auch nur den kleinsten Sprung erhält.)

Die Güte der Gläser wird bestimmt durch den amorphen Zustand, für die meisten Gläser durch die Lichtdurchlässigkeit für das sichtbare Spektrum, durch die geringe Leitfähigkeit in elektrischer sowie in thermischer Hinsicht, durch die hohe Widerstandsfähigkeit gegen Luft, Wasser usw., sowie durch die große Härte und Festigkeit. Die große Sprödigkeit der Gläser ist jedoch ein Mangel.

Die Gläser besitzen keinen festen Schmelzpunkt. Er ist für jedes Glas verschieden und liegt im allgemeinen aber unter 1300° C, bei Hartgläsern zwischen 1800° bis 2000° C und bei Quarzglas bei 1700° C. Bei Weißglut sind die Gläser dünnflüssig. Sie gehen mit sinkender Temperatur durch einen dickflüssigen und zähen in den festen Zustand (bei etwa 400° C) über. Die Formgebung findet in der Regel im zähflüssigen Zustande statt.

Von den elektrischen Eigenschaften der Gläser sind besonders der Oberflächenwiderstand, der spez. Widerstand und die Dielektrizitätskonstante zu erwähnen.

Der Oberflächenwiderstand ist bei nicht verwitterungsfesten Gläsern niedrig, denn in der durch Verwitterung aufgerauhten Oberfläche setzen sich leicht Feuchtigkeit und auch Staubteilchen fest, die die Oberflächenleitfähigkeit fördern. Durch den Oberflächenwiderstand ist auch die Überschlagsfestigkeit bedingt, die jedoch noch nicht näher bei Gläsern untersucht worden ist. Im allgemeinen geht das Oberflächenleitvermögen mit der Dicke der sich auf der Oberfläche des Glases gebildeten Feuchtigkeitsschicht („Wasserhaut") parallel. Erst bei etwa 100° C verschwindet die Oberflächenleitung nahezu vollständig. Widerstandsfähige, verwitterungsfeste Gläser, wie Quarzgläser, Kali- und Natron-Hartgläser, Borsilikatgläser, die wenig Alkali enthalten, Flintgläser, Jenaer alkalifreie Gläser von Schott und die Gläser aus Kalium-Bleisilikatgemischen, zeigen meist eine geringe Oberflächenleitung.

Der spez. Widerstand eines Glases ist vor allem von seiner Zusammensetzung abhängig und kann bei Zimmertemperatur Werte von 10^{11} bis 10^{20} Ohm/cm erreichen. Besonderen Einfluß auf diese Werte hat die Änderung des Alkali- und Erdalkaligehaltes. Aus der Zeichnung läßt sich der Verlauf der Temperaturabhängigkeit des spez. Widerstandes eines „Thüringer Glases" ersehen (Abb. 1).

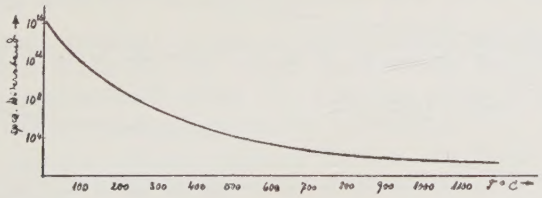


Abb. 1. Temperaturabhängigkeit des spez. Widerstandes eines „Thüringer Glases" (nach Fulda).

Der spez. Widerstand dieses Glases beträgt bei Zimmertemperatur etwa 10^{15} Ohm, um dann mit steigender Temperatur stetig abzusinken, und zwar bis etwa 10^{2} Ohm bei 900° C. Die Formel von Rasch und Hinrichsen gibt den Verlauf des spezifischen Widerstandes

eines Glases in Abhängigkeit von der Temperatur bis zum Transformationspunkt recht gut wieder. In der von ihnen angegebenen Formel

$$\log s = \frac{A}{T} + B$$

sind T die absolute Temperatur, A der Temperaturkoeffizient des spez. Widerstandes und B eine jeweils zu messende Konstante. Für die Temperaturen oberhalb des Erweichungspunktes versagt die Formel jedoch. Der Abfall findet dort schneller, als die errechneten Werte angeben, statt.

Zu den wichtigsten physikalischen Konstanten eines Glases gehört die Dielektrizitätskonstante. Je nach der Zusammensetzung der Gläser liegen ihre Werte zwischen 3,7 und 16. Bei zunehmender Temperatur steigen sie stetig an, um im Transformationspunkt vielfach außerordentlich hohe Werte anzunehmen. Die Dielektrizitätskonstante D wird mit Hilfe der Formel

$$D = \frac{C\mu\mu F \cdot 3{,}6 \cdot d}{r^2}$$

errechnet. Hierin ist C die Kapazität, d die Dicke und r der Radius des zu untersuchenden Dielektrikums.

Aus Abb. 2 können wir das Verhalten einiger Dielektrizitätskonstanten bei einer Erwärmung des betreffenden Glases von 25° auf 300° C ersehen. Bei dem gemessenen Weißwasser-Pyrex-Glas steigt die Dielektrizitätskonstante von 6,1 auf 6,8, bei dem Osram-Glas V 1447 III von 6,1 ebenfalls auf 6,8 und bei dem Thüringer Glas von Gundelach von 7,5 auf 7,9.

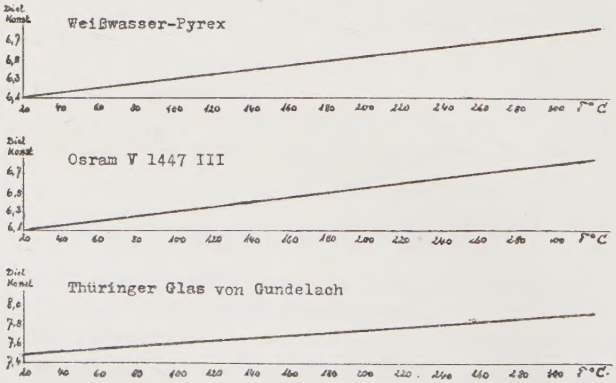


Abb. 2. Das Verhalten der Dielektrizitätskonstanten der Gläser: „Weißwasser-Pyrex", „Osram V 1447 III" und „Thüringer-Glas von Gundelach" bei Erwärmung der Materialien von 25° C auf 300° C

Bisher wurden die Dielektrizitätskonstanten für folgende technischen Gläser gemessen:

Material:	Dielektrizitätskonstante: bei ca. 25° C	bei 300° C
Quarzglas	3,75—4,2	
Quarzgut	3,8 —3,9	
Quarz =	4,7	
Flußspat	6,8	
Minosglas	7,5	
Bleiglas	6,7 (16,1)	
M (Osram)	7,4	7,9
V 301 (Osram)	7,6	8,1
Tempax	6,5	
Schott Supremax	6,0	6,2
Thüringer Glas	7,0 —7,1	
Thüringer Glas von Gundelach	7,5	7,9
584 d (Osram)	7,6	8,35
Geräteglas	6,5	
V 130 i (Osram)	7,8	9,5
Amerikanisches Pyrex-Glas	8,4	8,8
Weißwasser-Supremax	6,3	6,7
Weißwasser-Pyrex-Glas	6,1	6,8
V 424 d (Osram)	5,8	6,6
V 2877 III (Osram)	6,1	6,7
V 1447 III (Osram)	6,1	6,8

III. Messung von dielektrischen Verlusten von Gläsern (Osram-Materialien) bei den Frequenzen 30000 kHz bis 15000 kHz und den Temperaturen von 25° C bis 300° C.

Wie bereits erwähnt wurde, ist die Kenntnis der dielektrischen Verluste eines Materials bei seiner Verwendung als Isolierstoff in der Hochfrequenztechnik neben der Kenntnis seiner Dielektrizitätskonstanten mit von ausschlaggebender Bedeutung.

Es war mir zur Aufgabe gemacht worden, die Osram-Gläser:

a) Röhrengläser: V 301 b, M;

b) Gläser mit dem Ausdehnungskoeffizienten 80—100.10^{-7}/° C: 584 d, Thüringer Glas von Gundelach, V 130 i;

c) Gläser mit dem Ausdehnungskoeffizienten 32—50.10^{-7}/° C: Amerikanisches Pyrex-Glas, Schott-Supremax-Glas (V 1565 III), Weißwasser-Pyrex-Glas (V 394 b, Hartglas I), Weißwasser-Supremax-Glas (V 671 g, Hartglas II), V 1447 III, V 2877 III und V 424 d

bei den Frequenzen von 30 000 kHz bis 15 000 kHz (10,0 m bis 20,0 m) und Temperaturen von 25° bis 300° C auf ihre dielektrischen Verluste zu untersuchen.

1. Das Wesen und die Entstehung der dielektrischen Verluste.

Ein ideales Dielektrikum wird durch die Begriffe „Dielektrizitätskonstante" und „Leitfähigkeit" ausreichend charakterisiert.

Bei einem Kondensator mit einem idealen Dielektrikum folgt der durch das Dielektrikum gehende Strom dem Ohmschen Gesetz.

In der Praxis gibt es jedoch noch kein ideales Dielektrikum. Der Widerstand eines gewöhnlichen Dielektrikums ist im allgemeinen von der Größe der Spannung und von der Dauer ihrer Einwirkung abhängig. Einen großen Einfluß auf den spez. Widerstand und damit auf die Leitfähigkeit üben schon geringe Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung des betreffenden Materials und bei hygroskopischen Stoffen vor allem die Feuchtigkeit aus. Deshalb ist die Leitfähigkeit eine schlecht zu definierende Eigenschaft eines gewöhnlichen Dielektrikums.

Bringt man ein gewöhnliches Dielektrikum, das genügend lange Zeit keinem Einfluß elektrischer Felder ausgesetzt war, in ein elektrisches Feld mit der Stärke $\overline{E}_a$, so findet eine dielektrische Verschiebung

$$\overline{D} = D \cdot \overline{E}_a$$

statt, wenn D die Dielektrizitätskonstante ist. Ein Dielektrikum, das chemisch ein Gemisch darstellt, ist nach Maxwell als ein geschichtetes Dielektrikum zu betrachten. Bekanntlich beginnen nun bei der dielektrischen Verschiebung die Feldlinien auf den positiven und endigen auf den negativen Ladungen. Das bedeutet, daß auf den Trennflächen keine Ladungen sitzen dürften. Tatsächlich erhalten die Trennflächen jedoch nach und nach positive Ladungen, und die ursprüngliche Verteilung der Linien wird geändert. Sie ist von der Leitfähigkeit λ der verschiedenen Dielektrika abhängig.

Bei einem aus einem chemischen Gemenge hergestellten Dielektrikum wird die Beziehung

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{D_1}{D_2}$$

nicht inne gehalten. Daher tritt bei Wegnahme des elektrischen Feldes $\overline{E}_a$ eine Nachwirkung ein. Diese Nachwirkung tritt immer bei einem aus einem chemischen Gemenge hergestellten Dielektrikum auf.

Wird nun der Stromkreis, in dem sich der Kondensator mit dem geschichteten Dielektrikum befindet, unterbrochen, so tritt die Nachwirkung so in Erscheinung, daß die Ladungen, die sich auf der

Trennungsschicht befinden, zu den beiden Belegungen B_1 und B_2 wandern und diese aufladen. Diese Ladung wird als der sogenannte Rückstand bezeichnet.

Für einen Kondensator, der bei sinusförmiger Wechselspannung geladen wird, bedeutet also die durch die dielektrische Verschiebung bedingte Nachwirkung, daß die Spannung um einen kleinen Winkel δ in der Phase zurückbleibt bzw. daß der Strom um

$$-\varphi = 90° - \delta$$

der Spannung vorauseilt. Es entsteht ein dielektrischer Verlust, ein Energieverlust,

$$N = \omega \cdot P_e^2 \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta \ ,$$

worin $\omega = 2\pi\nu_{(Hz)}$ die Kreisfrequenz, P_e die effektive Spannung und C die Kapazität ist. „δ" heißt dielektrischer Verlustwinkel, und „$\operatorname{tg}\delta$" bezeichnet man als den Verlustfaktor. Solange $\operatorname{tg}\delta$ klein ist, gibt $\operatorname{tg}\delta = \sin\delta = \cos\varphi$. „$\cos\varphi$" wird als Leistungsfaktor bezeichnet.

Für die Praxis ist es jedoch bequemer, einen Kondensator mit dielektrischen Verlusten durch eine ideale, verlustfreie Kapazität K mit parallel geschaltetem großen Widerstand r oder durch eine verlustfreie Kapazität C in Reihe mit einem kleinen Widerstand R ersetzt zu denken.

Legt man an die beiden Belegungen eines Kondensators mit einem idealen Dielektrikum eine Wechselspannung an, so ergibt sich bekanntlich eine Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung von genau 90°. (Als ideales Dielektrikum ist das Vakuum bzw. die Luft anzusehen.) In diesem Fall findet also kein Energieverlust statt. Ersetzt man nun das ideale Dielektrikum des Kondensators durch irgendwelche feste oder flüssige Dielektrika, die ja alle eine begrenzte Leitfähigkeit besitzen, so muß man feststellen, daß die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung etwas geringer als 90° ist. Die Größe dieser Abweichung ist der schon beschriebene Verlustwinkel δ.

Bei der ersten Anordnung, also wenn zu einer verlustfreien Kapazität K ein großer Widerstand r parallel geschaltet ist, gilt für den Phasenwinkel φ

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}\varphi &= -\operatorname{tg}(90° - \delta) = -1/\operatorname{tg}\delta \\ &= -r\,\omega\,K. \end{aligned}$$

In diesem Falle ist also

$$r = 1/(K\,\omega\,\delta).$$

Denkt man sich dagegen die zweite Anordnung, die ideale, verlustfreie Kapazität C in Reihe mit einem kleinen Widerstand R, dann ist

$$\delta \approx \operatorname{tg}\delta = R\,\omega\,C.$$

Es besteht zwischen K und C die Beziehung $K \cdot \cos^2 \delta = C$. δ ist jedoch fast immer sehr klein, so daß $C = K$ wird.

Da es sich bei den Messungen nur um sehr geringe Verlustwinkel handelte, wurde nach der zuletzt genannten Formel

$$\operatorname{tg} \delta = R \omega C$$

gerechnet. Die Kapazität C dieser Formel setzt sich aus der eigentlichen Kapazität C_{12} und einer Streukapazität C_p zusammen, die parallel zu C_{12} liegt (Abb. 3).

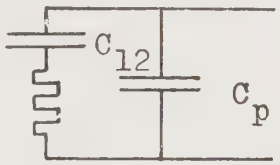


Abb. 3. Ersatzschema für die Kapazität C.

Bei Berücksichtigung der Streukapazität erhält man die endgültige Formel

$$\operatorname{tg} \delta = R \omega C_{12} (1 + C_p/C_{12})^2.$$

Da die Streukapazität C_p jedoch schwierig genau zu bestimmen ist, wurde sie so klein wie möglich gehalten. Der durch die Streukapazität bedingte Korrekturfaktor

$$\gamma = (1 + C_p/C_{12})^2$$

besaß daher auch einen so kleinen Wert, daß er vernachlässigt werden konnte, wie in den folgenden Ausführungen zu erkennen ist.

2. Auswahl der Methode und Aufbau der Meßanordnung.

Zur Messung der Verlustfaktoren wurde die Resonanzmethode gewählt. Diese Methode gestattete ohne allzu große Schwierigkeiten, auch Materialien mit nur sehr geringem Verlustwinkel zu messen. Das Prinzip dieser Methode ist aus Abb. 4 zu ersehen. Man koppelt an den Schwingkreis I eines Senders einen Meßkreis II an. An den

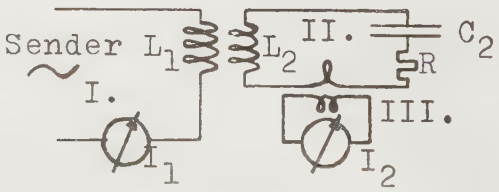


Abb. 4.

Meßkreis II wird der Indikatorkreis III gekoppelt. Im Meßkreis befinden sich L_2 und der zu prüfende, mit Verlusten behaftete Kondensator. Dieser Kondensator kann, wie schon vorher gezeigt wurde, durch einen verlustfreien Kondensator C_2 und einen in Reihe geschalteten Widerstand R ersetzt werden. Von dieser Tatsache wird auch Gebrauch gemacht.

a) Beschreibung des Senders.

Als Sender diente ein Gegentaktsender, wie er in Abb. 5 gezeigt wird.

L_1 = 1 u. 2 Wdg. ($\varnothing$ = 7,5 cm, 6 mm-Kupferrohr),
C_1 = 110 cm,
I_1 = 3,5—4,8 Amp. (Weston-Thermokreuz-Amperemeter 5 Amp.),
C = 750 cm,
D = 200 Wdg.,
U_g = 30—40 Volt,
Sicherung S = 200 mA.

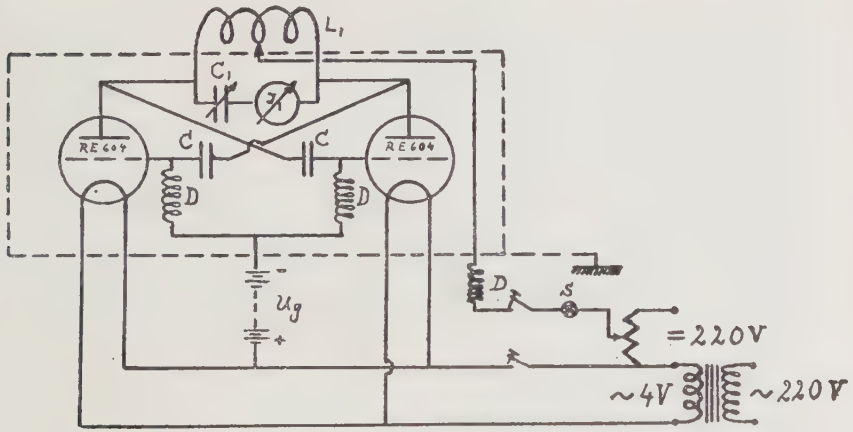


Abb. 5. Schaltschema des zur Messung benutzten Gegentaktsenders.

Als Senderöhren wurden zwei Telefunken-Röhren ‚RE 604' (Durchgriff 27 %, Nv = 12 Watt, S = 3,5 mA/Volt) benutzt, die sich gut bewährten. Zur Erzielung der notwendigen Betriebsspannungen dienten ein 220 Volt-Wechsel- bzw. Gleichstromnetz, und zwar das Wechselstromnetz durch Heruntertransformation auf 4 Volt zur Heizung und das Gleichstromnetz zur Anodenspeisung. Die Gittervorspannung von 30 bis 40 Volt lieferte eine Trockenbatterie. Der Drehkondensator C_1 im Schwingkreis hatte eine Kapazität von

110 cm („Saba"-Kurzwellenorthometer). Zur Messung des im Schwingkreis vorhandenen Stroms, des Schwingstroms I_1, diente ein Weston-Thermokreuz-Amperemeter von 5 Amp. (Die Genauigkeit dieser Instrumente ist nach den Angaben von Berkowitz sehr hoch und beträgt ± 2% des vollen Skalenwertes). Für die Spulen L_1 des Schwingkreises wurde weiches, ausgeglühtes, blankes Kupferrohr von 6 mm Außendurchmesser verwendet. Sie bestanden für $\lambda = 10$ m bis $\lambda = 20$ m aus ein bzw. zwei Windungen mit einem Innendurchmesser von 7,5 cm. Die Verbindungen zwischen den einzelnen Schaltelementen wurden so kurz wie möglich gehalten. Zum Schutz gegen äußere elektrische Störungen wurde der Sender mit einem Faraday-Käfig umgeben, der mit der Erde leitend verbunden war. Nur die Spule des Schwingkreises und die Stromzuführungen ragten aus dem Käfig heraus.

Bei diesem Aufbau arbeitete der Sender mit einer guten Konstanz. Die Stärke des Schwingstroms I_1 hielt sich bei den angewandten Frequenzen zwischen 3,5 und 4,8 Amp.

b) Aufbau der Meßanordnung.

Der Aufbau der Meßanordnung (Kreis II und III) erfolgte nach der in Abb. 6 dargestellten Schaltskizze. Er war sehr gedrängt und stand unter der Bedingung, Temperaturmessungen anzufertigen. Beim Aufbau der Meßanordnung mußte der gleichmäßigen Stromverteilung wegen die Symmetrie gewahrt werden. Zur Vermeidung von elektrischen Störungen, wie Streufelder und Streukapazitäten, sowie besonders der Temperatur wegen mußte Metall als Haltevorrichtung vermieden werden. Im Einflußbereich der Temperatur befindliche Verbindungsstellen wurden zur Verhinderung von Wackelkontakten mit Silberlot gelötet. Nur dort, wo Lötstellen nicht angängig waren, wurden Schraubverbindungen angewendet und Stecker

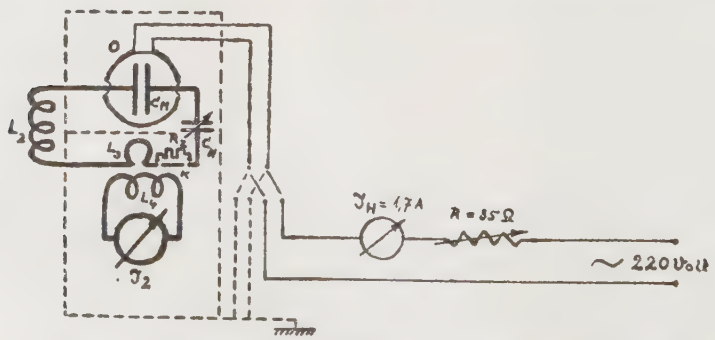


Abb. 6. Schaltschema der Meßanordnung (Kreis II und III).

möglichst vermieden. Der Kreis II enthielt die Spulen L_2 und L_3, den Abstimmungskondensator C_N, den Meßkondensator C_M und den C_M umgebenden Ofen O, während der Eichung ferner die Zusatzwiderstände R_z.

Im Indikatorkreis befanden sich die Kopplungsspule L_4 und das Ableseinstrument für I_2, ein äußerst empfindliches Thermokreuzinstrument von Hartmann u. Braun mit einem Meßbereich von 30 mA. Dies Ableseinstrument für I_2 im Kreis III war an den eigentlichen Meßkreis II angekoppelt worden, um den Widerstand dieses Kreises möglichst gering zu halten.

Die Meßanordnung wurde ebenso wie der Sender zum Schutz gegen äußere elektrische Einflüsse in einen Faraday-Käfig gesetzt, so daß nur L_2 und die Stromzuführung zum elektrischen Ofen, sowie der Bedienungsgriff des Abstimmkondensators aus dem mit der Erde leitend verbundenen Käfig herausragten.

Zwischen den beiden Kopplungsspulen L_1 und L_2 war zur Verhinderung einer kapazitiven Kopplung zwischen Sender und Meßkreis ein Gitter aus senkrecht gespannten Kupferdrähten aufgestellt worden. Die Kopplung war also rein induktiv. Wie durch Versuche festgestellt wurde, konnte eine kapazitive Kopplung der beiden Kreise I und II auch durch eine extrem lose Kopplung vermieden werden, wobei das eben beschriebene Abschirmgitter zwischen den beiden Apparaturen fortfiel. Wiederholt zeigten beide Meßarten die gleichen Ergebnisse. Für den Sender und die Verlustwinkelmeßanordnung war je ein Käfig notwendig, damit der Abstand zwischen Kreis I und II leicht verändert werden konnte.

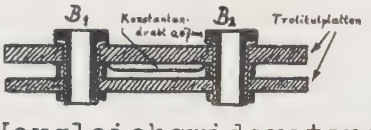
Zwischen den Verbindungsleitungen der Meßanordnung war ebenfalls eine Abschirmwand aufgestellt worden, die eine gegenseitige Beeinflussung der beiden Stromzuführungen verhinderte. Der Meßkondensator selbst war während der Messung mit Hilfe der an Erde gelegten Heizspiralen des Ofens gegen äußere Einflüsse geschützt. So konnte die sonst auftretende, störende Streukapazität innerhalb des Meßkreises soweit vermieden werden, daß sie für das Meßergebnis kaum noch von Bedeutung war und sich im Rahmen der allgemeinen Fehlergrenzen hielt.

b. 1. Die Induktionsspulen L_2, L_3 und L_4.

Die Induktionsspulen L_2, L_3 und L_4 wurden ebenfalls aus blankem, weichem Kupferrohr von 6 mm Außendurchmesser angefertigt. L_2 bestand je nach der Frequenz aus 1 bis 4 Windungen bei 7,5 cm Spulendurchmesser. L_3 diente zur Ankopplung des Meßkreises II an seinen Indikatorkreis III, während L_4 als Koppelspule im Indikatorkreis III verwendet wurde. L_3 war eine Schleife von 6 cm Durchmesser. L_4 hatte einen Durchmesser von 7,5 cm bei 3 Windungen.

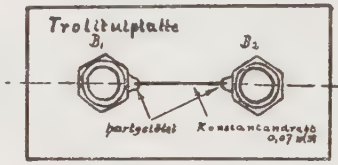
b. 2. Die Vergleichswiderstände (Zusatzwiderstände) R_z.

Zur Eichung der Meßanordnung wurden der Kurzschlußbügel K entfernt und die Vergleichswiderstände R_z eingeschaltet. Die Vergleichswiderstände mußten selbstinduktionsarm und skineffektfrei sein. Die Widerstände wurden aus 0,07 mm starkem Konstantandraht hergestellt. Der Draht lagerte freischwebend zwischen zwei Einsteckbuchsen B_1 und B_2, mit denen er durch Silberlot verbunden war. Die Einsteckbuchsen waren in zwei kleine, dünne Trolitulplatten eingelassen, wie aus Abb. 7 und 8 zu ersehen ist.



Vergleichswiderstand R_Z (natürl. Größe).

Abb. 7.



R_Z

Abb. 8.

Die Größen der Vergleichswiderstände betrugen:

$R_{z_1} = 0{,}205$ Ohm $\quad R_{z_3} = 0{,}96$ Ohm $\quad R_{z_5} = 2{,}59$ Ohm
$R_{z_2} = 0{,}53 \quad R_{z_4} = 1{,}8$

b. 3. Der Abstimmkondensator C_N.

Der Abstimmkondensator der Meßanordnung C_N war ein hochwertiger „Förg"-Kondensator. Da alle Isolierteile durch „Frequenta D" ($\operatorname{tg}\delta = 1{,}8 \cdot 10^{-4}$) ersetzt worden waren, besaß der Kondensator kaum dielektrische Verluste, und sein Anfangswert konnte dadurch von 15 µµF auf 11 µµF heruntergesetzt werden. Sein Endwert betrug 310 µµF (Abb. 9).

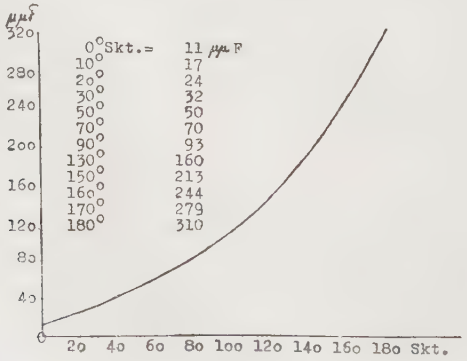


Abb. 9. Eichkurve des Abstimmkondensators C_N. („Förg"-Kurzwellen-Kondensator, die Isolierteile sind durch „Frequenta D" ersetzt worden.)

Die Kapazität dieses Kondensators wurde in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, Berlin, genau gemessen. Zur Bedienung des Kondensators diente, wie auf Abb. 13 und 14 deutlich zu sehen ist, ein ungefähr 30 cm langes, auf die Achse des Kondensators aufgestecktes Pertinax-Rohr, das wenige Zentimeter aus dem Abschirmkäfig herausragte und dort mit einem Einstellknopf versehen war.

b. 4. Bau des Meßkondensators C_M und des ihn umgebenden Ofens.

Die schwierigste Aufgabe bestand in der Herstellung des Meßkondensators C_M und des elektrischen Ofens O. Nach mehreren Versuchen mit Anordnungen, die sich als unzuverlässig und unbrauchbar erwiesen hatten, wurde schließlich an der im folgenden beschriebenen Ausführung festgehalten, die sich gut bewährt hat. Im Gegensatz zu den vielfach üblichen, waagerechten Anordnungen des Meßkondensators, zu dessen Halterung meistens Metall verwendet werden muß, um die nötige Stabilität des Aufbaus zu gewährleisten, wurde ein senkrechter Aufbau vorgezogen. Diese senkrechte Anordnung hatte den Vorteil, daß sich Metallhalterungen, die bei den großen Temperaturen in thermischer sowie elektrischer Hinsicht sehr ungünstig sind, vermeiden ließen. Der senkrechte Aufbau gewährleistete ferner eine gleichmäßige Wärmeverteilung, da der Ofen bei solchem Aufbau eine gute Abschirmung gegen Wärmeabstrahlung gestattete. Als besonderer Vorteil ergab sich aus der zentralen Anordnung des Meßkondensators C_M im Ofen die in allen Teilen vollkommen gleichmäßige Erwärmung von C_M.

Der Meßkondensator C_M war verhältnismäßig einfach gebaut. Er bestand aus zwei aus Messing gedrehten Kondensatorplatten E mit dem Plattendurchmesser 40 mm und der Höhe 7,5 mm. An den beiden Kondensatorplatten waren der Halterung wegen je ein Stutzen von 7,5 mm Durchmesser und 15 mm Höhe mit angedreht worden. Die untere Kondensatorplatte wurde von einem 10 cm langen Rohr aus dem verlustarmen, keramischen Material „Frequenta D" getragen. Hierbei mußte beachtet werden, daß sich zwischen dem Stutzen der Kondensatorplatte und dem darübergeschobenen Rohr ein gewisser Spielraum befand; denn der Wärmeausdehnungskoeffizient von Messing gehört mit zu den höchsten aller Metalle (bis 300° C: $\alpha = 60 \cdot 10^{-4}$). Das Tragrohr wurde von einem senkrecht in die Fußplatte eingesenkten, vorher gut ausgetrockneten Holzstutzen aufrecht gehalten (Abb. 10).

Die obere Kondensatorplatte trug ein über den Stutzen geschobenes, zweites Rohr aus „Frequenta D", das die gleichen Abmessungen wie das eben beschriebene Rohr besaß; nur hatte es noch einen ungefähr 65 mm langen und 1,5 mm breiten Ableseschlitz zur Ablesung des Thermometers. Das Rohr sowie der obere Stutzen besaßen 10 mm oberhalb des Stutzenansatzpunktes an der Kondensatorplatte

eine durch den Mittelpunkt des Stutzens gehende, kleine Bohrung von 1 mm Durchmesser. Durch diese Bohrung wurde ein kurzer Messingstift geschoben, der zur Verbindung des Rohres mit der Kondensatorplatte diente. Dieser Messingstift war im Durchmesser wiederum etwas kleiner als die Bohrung. (Bei ungenügend großem Spielraum platzte das spröde, keramische Material infolge der starken Ausdehnung bei 300° C leicht weg.)

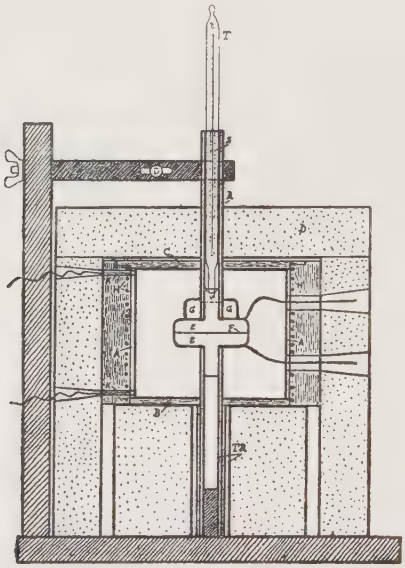


Abb. 10. Aufbau des Meßkondensators C_M und des ihn umgebenden Ofens O.

T = Thermometer,
S = Ableseschlitz,
R = Tragrohr für das Thermometer,
D = Diatomit
TR = Tragrohr für den Ofen bzw. für die untere Meßkondensatorplatte.

In den Stutzen der oberen Kondensatorplatte war eine kleine Vertiefung V eingelassen, die zur Vergrößerung der Berührungsfläche zwecks besserer Wärmeübertragung zwischen Thermometerfuß und Kondensatorplatte diente (Abb. 15).

Die beiden Zuführungen zu den Kondensatorplatten bestanden aus 4 mm breiten und 0,5 mm starken, weichgeglühten Elektrolytkupferbändern, die zur Vermeidung von Wackelkontakten mit Silberlot hart an die Meßkondensatorplatten angelötet waren. Litze konnte

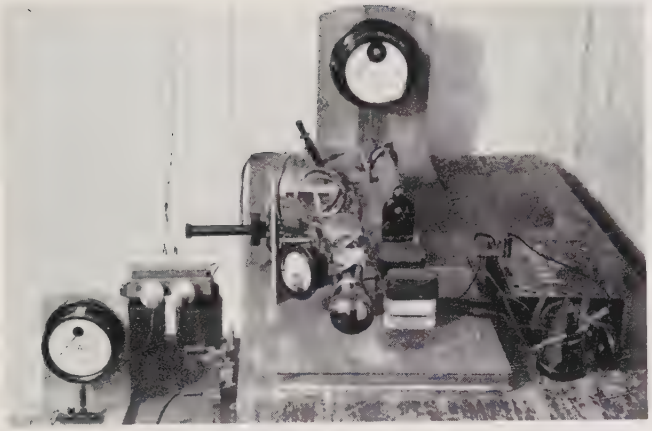


Abb. 11. Ultrakurzwellensender für die Wellenlängen von 9—25 m.

Abb. 12. Zur Messung eingestellte Verlustwinkelmeßanordnung.

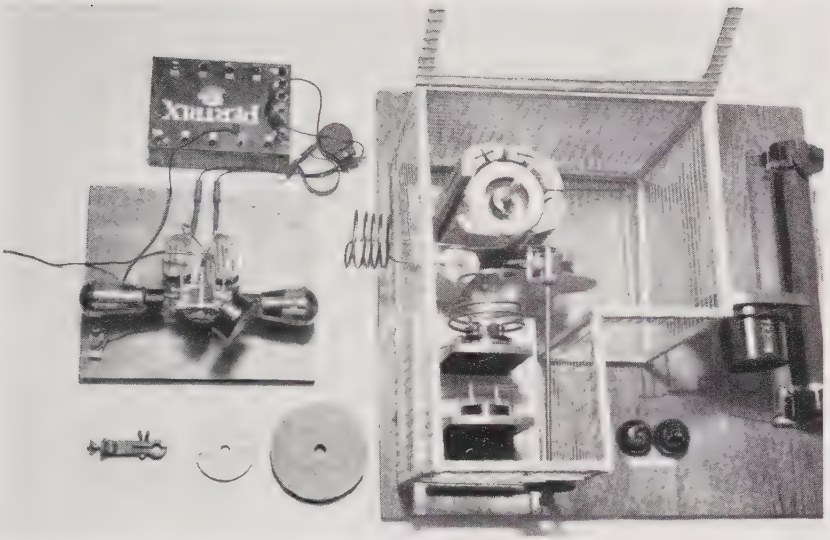


Abb. 13. Anordnung zur Messung von Verlustwinkeln von Gläsern in Abhängigkeit von der Temperatur.

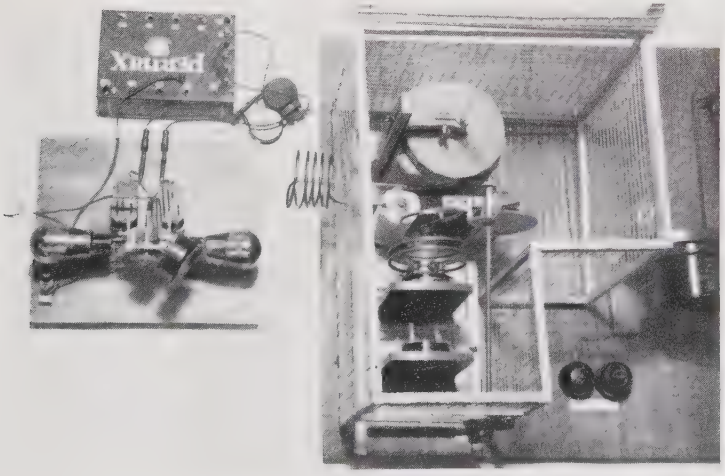


Abb. 14. Meßanordnung zur Eichung eingestellt.

nicht verwendet werden, da sie im Falle der Oxydation, die bei der großen Hitze meist sehr schnell eintrat, nur äußerst schwierig und unvollkommen zu säubern war.

Abb. 15.

Damit ein gutes und festes Anliegen der Kondensatorplatten an die zu untersuchenden Meßplatten gewährleistet war, wurden die Flächen F der Kondensatorplatten plan geschliffen und sorgfältig darüber gewacht, daß die Flächen auch plan blieben. Zu diesem Zweck wiederholte sich das Planschleifen der Kondensatorplatten nach jeder fünften bis sechsten Messung.

Zur Beschwerung der oberen Kondensatorplatte diente ein kleines Messinggewicht G von ca. 150 g.

Zur Erzeugung der notwendigen Hitze wurde ein elektrischer Ofen gewählt. Dieser Ofen zeichnete sich vor allem durch seine geringe Größe, seine schnelle Erzeugung der gewünschten Temperatur und durch seine Zuverlässigkeit aus. Er war aus hochwertigem, keramischem Steatit-Material, aus der sogenannten „St.-F.-Masse" der Steatit-Magnesia-A.G., aufgebaut. Die runde Form glich eventuell auftretende Spannungen im Material, die durch die großen Temperaturdifferenzen bedingt waren, leichter aus, wodurch ein Springen des Ofenmantels vermieden wurde. Aus dem gleichen Grunde war der Ofen aus drei Teilen hergestellt, und zwar aus dem zylinderförmigen Steatitkörper A, der Bodenplatte B aus „Fulgurit", einem Asbest-Schiefermaterial, und dem Deckel C aus dem gleichen Material. Der Rundkörper A wurde mit der Bodenplatte B durch einen Kitt aus Natriumsilikat („Wasserglas") und reinem Quarzmehl verbunden. Die in den Rundkörper eingelassenen, runden Öffnungen zur Durchführung der Zuleitungen zum Meßkondensator und der Befestigungsschrauben der Heizspirale H und der Einsteckklemmen K mußten der großen Härte des keramischen Materials wegen durchgeschmirgelt werden, was sehr mühsam war. In die Außenfläche des Rundkörpers wurden zur Führung der Heizspirale flache Rillen eingeschliffen. Die Heizspirale, die in zwölf Windungen um den Rundkörper gelegt war, hatte eine Drahtlänge von 6,1 m bei 0,3 mm Durchmesser. Sie bestand aus Chromnickel-„Cekas"-Material. Um die

erforderliche Wärmemenge erzielen zu können, wurde der Ofen für eine Temperatur von 450° C berechnet. Da sich in diesem Fall als zu erwärmendes Material im Ofen außer der Luft noch die Messingmeßkondensatorplatten befanden, mußte die Formel für die Berechnung der Wärmemenge in der Form

$$Q_{kcal} = G \cdot c \cdot (T_2 - T_1) + G' \cdot c' \cdot (T_2 - T_1)$$

angewendet werden.

Hierin bedeutet

G das Gewicht der im Ofen vorhandenen Luft,
G' das der Messingmeßkondensatorplatten und des Messinggewichts „G",
c die spez. Wärme der Luft,
c' die des Messings und
T_1, T_2 die Anfangs- und die Endtemperatur.

Setzte man die entsprechenden Werte in die obige Gleichung ein, so erhielt man als notwendige Wärmemenge:

$$Q = 18{,}3 \text{ kcal} = 18\,300 \text{ cal.}$$

Die Leistung des Ofens konnte mit Hilfe der Formel

$$N = I^2 \cdot R \text{ Wattsec}$$

bestimmt werden.

Der Widerstand des angegebenen Chromnickel-Cekas-Drahtes von 6,1 m Länge und 0,3 mm Durchmesser betrug R = 93,2 Ohm, und bei einer Stromstärke von 1,7 Amp. erzeugte er eine Temperatur von 450° C.

Nach dem Ohmschen Gesetz

$$V = I \cdot R$$

war aber bei

$$V = 220 \text{ Volt}$$

und

$$I = 1{,}7 \text{ Amp.}$$

der Gesamtwiderstand

$$R = 129 \text{ Ohm}$$

aufzubringen. Es mußte daher, damit keine Überbelastung der Heizspiralen auftreten konnte, noch ein Widerstand von

$$R \approx 35 \text{ Ohm}$$

in Reihe zu den Heizspiralen geschaltet werden.

Theoretisch betrug also die Leistung N des Ofens

$$N = 1{,}7^2 \cdot 129 = 375 \text{ Wattsec,}$$

was der Erzeugung einer Wärmemenge von 90 cal in einer Sekunde

entspricht. Die zur Erwärmung auf 450° C erforderlichen 18 300 cal könnten demnach theoretisch in einer Zeit von

$$t = \frac{18300}{90 \cdot 60} = 3{,}4 \text{ Minuten}$$

von dem Ofen aufgebracht werden. Diese kurze Zeit war jedoch praktisch schwierig zu erreichen, da durch Wärmestrahlung nach außen immer ein großer Wärmeverlust entsteht. Aus Abb. 16 ist der praktisch erreichte Temperaturverlauf im Ofen in Abhängigkeit von der Zeit zu ersehen. Eine Messung dauerte durchschnittlich 80 Minuten. Die Temperatur von 300° C wurde nach ca. 4 bis 5 Minuten erreicht.

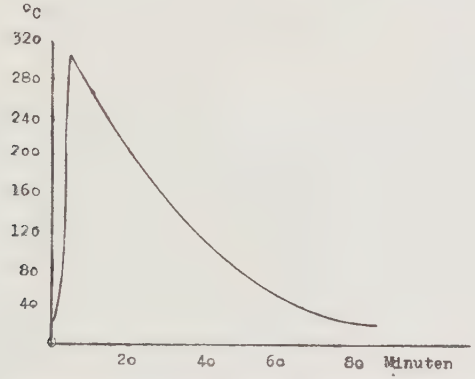


Abb. 16. Temperaturverlauf im Ofen in Abhängigkeit von der Zeit.

Die Heizspirale war zusammen mit Asbestschnur aufgewickelt, und zwar so, daß auf eine Windung der Heizspirale immer eine Windung Asbestschnur folgte. So konnten sich nie zwei Windungen der Heizspirale berühren. Diese Anordnung war notwendig; denn bei der großen, im Innern des Ofens herrschenden Hitze bestand die Gefahr, daß die Spirale durch ihre Ausdehnung leicht verrutschte. Falls eine Berührung zweier Heizspiralwindungen stattfand, brannte der Ofen durch die entstandene Überlastung sofort durch. Zur Verhinderung des Wärmeverlustes nach außen wurde um den Rundkörper eine ungefähr 2 cm starke Packung aus Asbestschnur gelegt, deren einzelne Lagen durch den schon erwähnten Kitt aus Natriumsilikat und Quarzmehl gebunden und zusammengehalten waren. Der Ofen ruhte auf einem über das Tragrohr der unteren Kondensatorplatte geschobenen Rohr, das ebenfalls aus „Frequenta D" bestand. Um den Wärmeverlust noch weiter herabzusetzen und um vor allem eine gleichmäßige Erwärmung der Kondensatorplatten zu erzielen, erhielt der so aufgebaute Ofen noch eine ungefähr 2,5 cm starke Umkleidung

aus „Diatomit". (Diatomit ähnelt im Aussehen einem Schamottstein, ist jedoch sehr porös und mit dem Messer oder einer Säge sehr leicht zu bearbeiten. Diatomit wird u. a. beim Bau von elektrischen Öfen zum Schutz gegen Wärmeabstrahlung verwendet und hat sich bestens bewährt.) Bei dieser Abschirmung des Ofens war es möglich, den schon beschriebenen, guten Temperaturverlauf zu erzielen.

Wie schon bei der Besprechung der Abschirmung der Meßanordnung angegeben wurde, war während der Messung selbst die Stromzufuhr des Ofens unterbrochen, und mittels eines Umschalters wurden die beiden Enden der Heizspirale an Erde gelegt. Etwaige durch die Heizspiralwindungen hervorgerufene, elektrische Störungen konnten so verhindert werden. Gleichzeitig wirkte die Heizspirale so als kleiner Faraday-Käfig für den Meßkondensator und schützte ihn so gegen äußere Einflüsse.

b. 5. Die Meßplatten.

Die zu untersuchenden Meßplatten bestanden aus kleinen, runden, mit Metall belegten Glasplatten, die einen Durchmesser von etwa 4 cm und eine Dicke von durchschnittlich etwa 1 mm hatten.

Die Platten waren mit Hilfe des Pistolenspritzverfahrens (der Fa. „Metallisator", Bln.-Neukölln) mit einer festen, dünnen Zinkschicht belegt zur Vermeidung von evtl. auftretenden Luftpolstern zwischen den eigentlichen Meß- und Meßkondensatorplatten. So stellte jede Meßplatte einen kleinen Kondensator dar. Ohne Metallisierung war es nicht möglich, den wahren Kapazitätswert der Platten zu messen. (Die Messungen der Platten ohne Metallbelegungen zeigten durchweg um etwa 20 % zu kleine Kapazitätswerte gegenüber den mit Metall belegten Platten.) Die Oxydation und Verunreinigung der Belegungen waren sorgfältig verhütet worden. Zu diesem Zwecke wurden auch die Platten vor jeder Messung gut mit Äther gereinigt. Bei der Messung wurden die Meßplatten so fest zwischen die beiden Platten des Meßkondensators geschoben, daß Luftpolster auch hier vermieden wurden.

c) Die Eichung des Meßkreises, die Messung der Größen R, ω, C und die Messung der Temperatur.

Die in der Formel für den Verlustwinkel

$$\operatorname{tg} \delta_{(25-300^\circ C)} = R \cdot \omega \cdot C$$

enthaltenen Größen wurden getrennt gemessen.

c. 1. Die Eichung des Meßkreises.

Wichtig für die Messungen war, daß der Schwingstrom des Senders I_1 konstant blieb.

Das Prinzip der Meßmethode bestand darin, daß der mit Verlusten behaftete Kondensator durch einen verlustfreien Kondensator C_0 und durch einen in Reihe geschalteten Widerstand R_0 ersetzt wurde. Bei zunehmender Temperatur wuchsen nun die Verluste des Dielektrikums. Diese dielektrischen Verluste und deren Änderung bei Temperatur und Frequenz wurden bestimmt durch Vergleich mit dem bei Zimmertemperatur, unter Einschaltung verschiedener Widerstände bei den verschiedenen Frequenzen, geeichten Resonanz- bzw. Meßkreis. Zunächst wurde daher der Meßkreis in Ohm geeicht ($R_z = f\,[I_1/I_2]$). Die Werte für das R der Formel konnten dann aus der erhaltenen Eichkurve entnommen werden, wenn man I_1 und I_2 kannte.

Zur Eichung des Kreises wurde der Meßkondensator in einen Luftkondensator C_L umgebaut, indem die Hülse der oberen Kondensatorplatte in einen Holzbalken eingeklemmt wurde, wie aus der Abb. 14 ersichtlich ist. Der Abstand der beiden Kondensatorplatten, d. h. die Breite des Luftspaltes zwischen den beiden Kondensatorplatten, die meistens nur einen Bruchteil eines Millimeters betrug, war durch Auf- oder Abbewegung je nach Bedarf vermindert oder vergrößert worden. Zur Eichung wurden anstelle des Kurzschlußbügels, der, wie schon früher angegeben, zwischen dem Abstimmkondensator C_N und der Koppelschleife, die zur Ankopplung des Indikatorkreises diente, angebracht war, die ebenfalls schon beschriebenen Zusatzwiderstände R_z benutzt. Man brachte dann den Meßkreis durch Verändern von C_N mit dem Sender in Resonanz. Es ergab sich dann ein Stromwert I_2 im Meßkreis und dazu ein Stromwert I_1 im Senderschwingkreis.

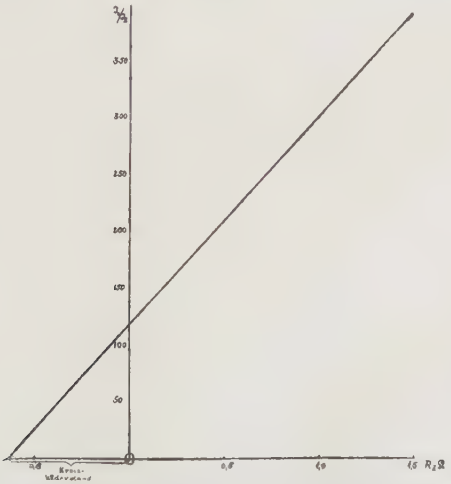


Abb. 17. Eichkurve (für $\lambda = 14{,}1$ m), erhalten durch Einschaltung der Widerstände R_z in den Meßkreis.

Die erhaltenen Werte wurden in ein Eichblatt eingetragen (Abb. 17), und zwar auf der Y-Achse die Quotienten I_1/I_2 und auf der X-Achse die Werte für die Zusatzwiderstände R_z. Die aus den Meßergebnissen hervorgegangene Eichkurve war eine Gerade.

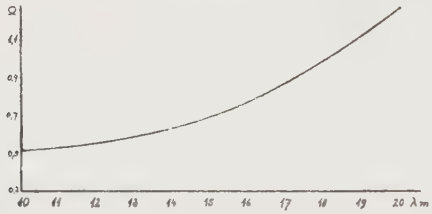


Abb. 18. Abhängigkeit des Meßkreiswiderstandes von der Wellenlänge.

c. 2. Die Bestimmung von R, ω und C.

Stimmte man bei der eigentlichen Untersuchung des Materials den Meßkreis auf den Sender ab, so erhielt man bei den verschiedenen Temperaturen ein bestimmtes, zu I_1 gehörendes I_2.

Nach Bildung des Quotienten I_1/I_2 entnahm man aus der dazugehörigen Eichkurve den entsprechenden Wert für R, der dann bei der Rechnung in die Formel für den Verlustfaktor

$$\operatorname{tg} \delta = R \, \omega \, C$$

eingesetzt wurde. Der Verlauf von R_{Ohm} in Abhängigkeit von der Temperatur beispielsweise für das Material ‚584 d' bei der Wellenlänge von 20,0 m ist aus Abb. 19 ersichtlich.

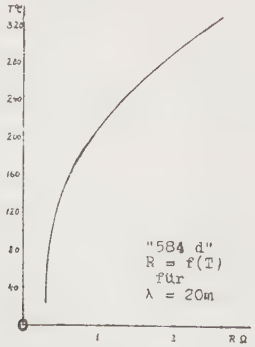


Abb. 19.

Aus der bekannten Formel $\omega = 2 \pi \nu = 2 \pi c/\lambda$
konnte die Kreisfrequenz ω errechnet werden. Die jeweilige Wellenlänge wurde mit einem Kurzwellenmesser (Bauart: Telefunken) gemessen.

Die Kapazität C der Formel für den Verlustfaktor setzte sich aus der bei Zimmertemperatur gemessenen Kapazität der mit Metall belegten, zu untersuchenden Meßplatten C_{12} und aus dem durch die Temperaturen bedingten ∂C_m zusammen: $C = C_{12} + \partial C_m$.

Die Kapazitäten C_{12} wurden nach der Differenzenmethode mit der Seibtschen Brücke gemessen. ∂C_m, die Änderung der Kapazität C_{12} bei den verschiedenen Temperaturen, konnte bei geringen Änderungen von C_{12} aus der Formel

$$\left| \partial C_m \right| = \left| \partial C_N \left(\frac{C_{12}}{C_{N\,(20^\circ C)}} \right)^2 \right|$$

errechnet werden. Der Wert für C_N ergab sich bei der Abstimmung des Meßkreises auf Resonanz bei 25° C während der Messung. Die Werte ∂C_N gaben den Betrag der Änderung von $C_{N\,(20^\circ C)}$ auf $C_{N\,(T^\circ C)}$ an: $\partial C_N = C_{N\,(20^\circ C)} - C_{N\,(T^\circ C)}$.

Ein störender Einfluß der Streukapazität von C_{12} wurde, da sie nur schwierig zu bestimmen war, von vornherein nahezu gänzlich vermieden. Eine Streukapazität fällt um so weniger ins Gewicht, je kleiner der Kondensatorplattenabstand gegenüber dem Durchmesser der Plattenflächen ist*). Die Meßplattendicke der zu untersuchenden Materialien wurde daher auch gegenüber dem Durchmesser der Plattenflächen von C_{12} so gering gehalten, daß nur eine sehr kleine Streukapazität auftreten konnte, die für das Gesamtmeßergebnis aber praktisch ohne jede Bedeutung war. [Allgemein könnte man eine Streukapazität von C_{12} nach der Formel $C_p = 2C_m'' - C_m'$ bestimmen. Hierin wäre C_p die gesuchte Streukapazität, $C_m' = C_{12} + C_p$ und $C_m'' = \frac{C_{12}}{2} + C_p$ die Kapazität einer Meßplatte doppelter Dicke, gleichen Materials und gleicher Abmessungen. Falls aber bei der praktischen Ausführung dieser Messungen anstelle einer Platte, die doppelt so

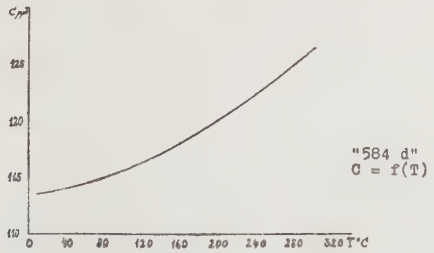


Abb. 20.

*) Siehe Westphal: Physik, 1928, S. 243, Anm. 1

dick wie C_{12} ist, zwei aufeinandergelegte Platten genommen werden müssen, lassen sich die Messungen im Sinne der vorgenannten Formel nicht ausführen; denn, da die Meßplatten nicht ganz genau plan sind, entstehen beim Aufeinanderlegen der Platten zwischen diesen Luftpolster, durch die eine Verfälschung der Werte eintritt. Das bewiesen zahlreiche entsprechende Versuche.]

c. 3. Die Messung der Temperatur.

Die Messung der Temperaturen erfolgte mit einem Thermometer, das in die Hülse der oberen Meßplatte eingesteckt war. Infolge der starken Abschirmung gegen Wärmeverlust war die Wärmeverteilung im Innern des Ofens vollkommen gleichmäßig. Wie die Nachmessung ergab, besaßen bei diesem Aufbau alle drei eben erwähnten Teile zu gleicher Zeit die gleichen Temperaturen. So zeigte das Thermometer gleichzeitig die Temperaturen an, die in der oberen sowie unteren Kondensatorplatte und im zu untersuchenden Dielektrikum herrschten. Zu der am Thermometer abgelesenen Temperatur mußte noch eine Korrektur hinzugefügt werden, die durch die Abkühlung des herausragenden Quecksilberfadens des Thermometers bedingt war. Diese Korrektur wurde nach der von Kohlrausch angegebenen Formel

$$K = 0{,}00016 \cdot a(T - T_0)$$

berechnet, wobei T_0 die Mitteltemperatur und a die in Graden ausgedrückte Länge des herausragenden Quecksilberfadens ist. T gibt die abgelesene Temperatur an. T_0 wurde bestimmt mit Hilfe eines kleinen Hilfsthermometers, dessen Gefäß etwa in der mittleren Höhe des herausragenden Quecksilberfadens hing. So ergab sich für den abgelesenen 300°-C-Wert bereits die erhebliche Korrektur von + 11,5° C (Abb. 21).

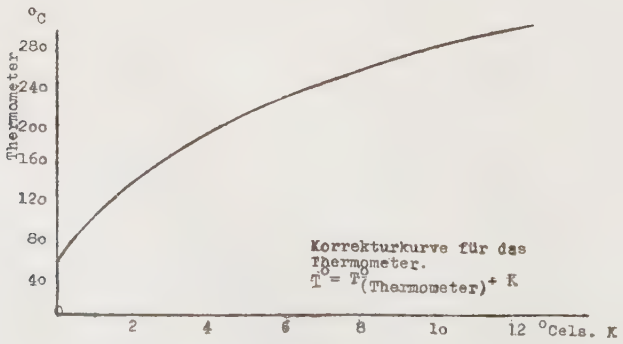


Abb. 21.

3. Allgemeines über den Messungsverlauf.

Bei Vergleich verschiedener Meßreihen gleichen Materials, gemessen unter gleichen Bedingungen, ergaben sich Abweichungen bis zu 4 %. Die wichtigsten der zu beachtenden Fehlerquellen waren die Feuchtigkeit, die Wärme, die elektrischen Streufelder und der Skineffekt.

Die Messungen wurden bei einer relativ hohen Raumfeuchtigkeit durchgeführt. Der höchste gemessene relative Feuchtigkeitswert betrug 96 % und der geringste 59 %. Diese Feuchtigkeit machte bei den Messungen zunächst viele Schwierigkeiten. Unter dem Einfluß der Feuchtigkeit wurden Abweichungen bis zu 400 % (nach Rhode bis zu 1000 %) vom eigentlichen Verlustfaktorwert festgestellt. Es mußte daher vor allem dafür gesorgt werden, daß bei jeder Messung die Meßanordnung und das betreffende, zu untersuchende Material absolut trocken waren. Die Meßanordnung und das Material wurden daher stets zunächst auf ca. 300° C erhitzt, und die eigentlichen Messungen wurden dann bei fallender Temperatur von 300° C auf 25° C durchgeführt. Aus Abb. 22 ist der Verlauf einer Meßreihe bei zunächst nicht genügend getrockneter Meßanordnung bzw. Meßplatte zu ersehen. Der tg-δ-Wert fällt zunächst bei zunehmender Temperatur erheblich ab, um dann bei ca. 75° C wieder anzusteigen. Von 100° C an waren die auf- und abwärts gemessenen tg-δ-Werte gleich. Erst bei bis auf über 100° C vorgewärmten Platten, denen auf diese Weise jegliche Feuchtigkeit entzogen worden war, deckten sich bei gleichfalls ausgetrockneter Meßanordnung die Anfangs- bzw. Endwerte bei 25° C, woraus sich ergab, daß zur Erzielung sicherer Werte die Methode des Abwärtsmessens vorzuziehen war.

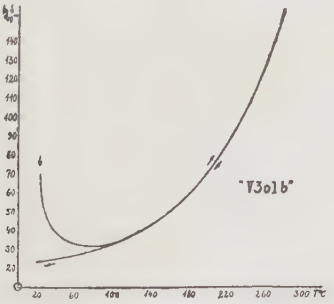


Abb. 22. Abhängigkeit von tg δ bei $\lambda = 14{,}1$ m von Feuchtigkeit und Temperatur.

Der Einfluß der Wärme machte sich vor allem bemerkbar durch die Entstehung einer Oxydationsschicht hauptsächlich auf den stromführenden Teilen der Anordnung, die im Bereich der hohen Tem-

peraturen lagen. Die Oxydationsschicht konnte den Kreiswiderstand bis zu 40 % verändern und eine gleichmäßige Stromverteilung innerhalb des Meßkreises in Frage stellen. Es war daher notwendig, die Anordnung dauernd blank zu halten, und sie wurde daher nach ungefähr jeder fünften Meßreihe gesäubert. Nach ungefähr jeder zehnten Meßreihe wurde zur Vorsicht die Anordnung vollkommen auseinander genommen, um alle Teile eingehend zu reinigen.

Im Einflußbereich der Temperatur und auch sonst vermied man möglichst Schraub- und Steckverbindungen, indem die Verbindungsstellen mittels Silberlot zusammengefügt wurden. Das Festsitzen der wenigen vorhandenen Schraub- und Steckverbindungen hatte man während der Temperaturmessung dauernd überwacht.

Zur weiteren Vermeidung von Fehlern im Meßergebnis sorgte man bei Sender und Meßanordnung für einen stabilen Aufbau. Zur Konstanthaltung des Schwingstroms im Sender brauchte man konstante Heiz- und Anodenquellen. Aus diesem Grunde verwendete man ein gut konstantes Wechsel- bzw. Gleichstromnetz. Die elektrolytkupfernen Zuführungen des Meßkondensators durften bei der Durchführung durch den Ofenmantel nicht an ihn anstoßen.

Die Messung und die dazugehörige Eichung des Kreises fand immer unter den gleichen Bedingungen statt, und so wurde z. B. immer mit eingestecktem Thermometer gemessen.

Bei Wiederholungsmessungen war darauf zu achten, daß immer die gleiche Meßplatte genommen wurde; denn, wie es sich herausstellte, ergaben verschiedene Schmelzen des gleichen Materials Abweichungen bis zu 4,5 %.

Die durch die angewandten — verhältnismäßig geringen — Stromstärken hervorgerufenen elektrischen Streufelder machte man unschädlich durch geeignete, an Erde gelegte Abschirmung zwischen den einzelnen Teilen der Meßanordnung, nachdem man Sender und Meßanordnung zum Schutze gegen äußere elektrische Störungen in je einen an Erde gelegten Faraday-Käfig gesetzt hatte. Zwischen den stromführenden Teilen des Meßkreises, die genügend weit voneinander angeordnet waren, stellte man (nach Angaben von Campbell und Shackelton) eine Abschirmwand auf.

Bei der Wahl des Widerstandsdrahtes für die Vergleichswiderstände mußte darauf geachtet werden, daß der Widerstandswert bei Wechselstrom möglichst genau mit dem Widerstandswert bei Gleichstrom übereinstimmte. Deshalb wurde ein Konstantandraht von 0,07 mm Durchmesser gewählt, bei dem diese Forderung in großer Annäherung zutraf.

Die Größe des jeweiligen Verlustfaktorwertes war durch die chemische Zusammensetzung bedingt. Es ergab sich, daß die tg-δ-Werte um so kleiner wurden, je homogener das zu untersuchende

Material zusammengesetzt war. Mit wachsender Inhomogenität stiegen auch die dielektrischen Verluste.

Die Werte für den Verlustfaktor tg δ zeigten eine beträchtliche Temperaturabhängigkeit. Sie nahm bei völlig ausgetrockneten Materialien je nach der Zusammensetzung mehr oder weniger rasch stetig zu.

IV.

Zusammenfassung und Gesamtergebnis.

Das Ergebnis der Arbeit besteht

erstens

in der Herstellung einer Meßanordnung, die es gestattet, mit guter Genauigkeit bei den Frequenzen von 15 000 kHz bis 30 000 kHz Verlustfaktormessungen in der Abhängigkeit von der Temperatur auszuführen, und

zweitens

in der Messung des Verlustfaktors einer Anzahl von Gläsern in Abhängigkeit von Temperaturen von 25° C bis 300° C.

Den Beweis für die Richtigkeit dieser Ausführungen liefern die in den nachfolgenden Abbildungen enthaltenen Meßergebnisse für den dielektrischen Verlustfaktor tg δ.

V.

Meßergebnisse.

1. Bei der Wellenlänge von $\lambda = 10$ m wurde der Verlustwinkel in Abhängigkeit von der Temperatur für folgende Gläser gemessen:

V 301 b, Röhrenglas,
Zusammensetzung, über 10 % SiO_2, K_2O, PbO,
unter 10 % CaO, Na_2O,
Dielektrizitätskonstante $D = 7{,}6$ (25° C) .. 8,1 (300° C);

M, Röhrenglas,
Zusammensetzung, über 10 % SiO_2, PbO,
unter 10 % Na_2O, K_2O,
Dielektrizitätskonstante $D = 7{,}4$ (25° C) .. 7,9 (300° C);

584 d, Ausdehnungskoeffizient $\alpha = 80 .. 100.10^{-7}/°$ C,
Zusammensetzung, über 10 % SiO_2, Na_2O,
unter 10 % Al_2O_3, B_2O_3, K_2O, BaO, CaO
Dielektrizitätskonstante $D = 7{,}6$ (25° C) .. 8,35 (300° C);

Thüringer Glas von Gundelach $\alpha = 80 \ldots 100.10^{-7}/^{\circ}$ C,
Zusammensetzung, über 10 % SiO_2, Na_2O,
unter 10 % Al_2O_3, B_2O_3, K_2O, BaO, CaO,
Dielektrizitätskonstante $D = 7{,}5$ (25° C) .. 7,9 (300° C).

Für den Verlustwinkel $\operatorname{tg}\delta$ ($\lambda = 10$ m) = f (T ° C) ergab sich für:

V 301 b		M		584 d		Thüringer Glas von Gundelach	
$\lambda = 10{,}0$ m		$\lambda = 10{,}0$ m		$\lambda = 10{,}0$ m		$\lambda = 10{,}2$ m	
T °C	tg δ	T °C	tg δ	T °C	tg δ	T °C	tg δ
23	$32 \cdot 10^{-4}$	25	$29 \cdot 10^{-4}$	22	$48{,}5.10^{-4}$	25	$45{,}5.10^{-4}$
50	32,8	65	32	50	56	83	64
80	38,4	81	35,2	78	68	106	98
106	41,8	104	37	105	78	142	103
130	50	132	45	157	117	175	140
160	60	158	56,7	180	145	215	196
187	77	181	64,6	198	170	236	232
205	91	220	98	224	212	257	265
235	126	243	135	248	267	279	302
250	148	268	190	275	320	290	326
276	198	290	257	297	375	301	345
290	226	309	336	308	403	313	369

Aus den Meßwerten erhält man demnach für:

T °C	V 301 b	M	584 d	Thüringer Glas von Gundelach
	$\lambda = 10{,}0$ m	$\lambda = 10{,}0$ m	$\lambda = 10{,}0$ m	$\lambda = 10{,}2$ m
	tg δ	tg δ	tg δ	tg δ
25	32.10^{-4}	29.10^{-4}	49.10^{-4}	$45{,}5.10^{-4}$
100	41	36	76	73
150	56	50	110	112
200	87	78	172	172
250	148	147	266	252
300	248	295	382	344

2. Bei der Wellenlänge von $\lambda = 14{,}1$ m bzw. $\lambda = 15{,}1$ m wurde der Verlustwinkel in Abhängigkeit von der Temperatur für folgende Gläser gemessen:

Schott-Supremax, V 1565 III,
Ausdehnungskoeffizient $\alpha = 32 \ldots 50.10^{-7}/^{\circ}$ C,
Zusammensetzung, über 10 % SiO_2 Al_2O_3,
unter 10 % B_2O_3, Na_2O, CaO, MgO,
Dielektrizitätskonstante $D = 6{,}0$ (25° C) .. 6,2 (300° C);

Amerikanisches Pyrex-Glas $\alpha = 32 \ldots 50.10^{-7}/° C$,
Zusammensetzung, über 10 % SiO_2, B_2O_3,
unter 10 % Al_2O_3, Fe_2O_3, Na_2O, K_2O, CaO, MgO, As_2O_3,
Dielektrizitätskonstante $D = 8{,}4$ (25° C) .. 8,8 (300° C);

V 424 d $\alpha = 32 \ldots 50.10^{-7}/° C$,
Zusammensetzung, über 10 % SiO_2,
unter 10 % Al_2O_3, B_2O_3, Na_2O, K_2O, BaO, As_2O_3,
Dielektrizitätskonstante $D = 5{,}8$ (25° C) .. 6,6 (300° C);

V 2877 III $\alpha = 32 \ldots 50.10^{-7}/° C$,
Zusammensetzung, über 10 % SiO_2,
unter 10 % Al_2O_3, B_2O_3, Na_2O, BaO, MgO, As_2O_3, K_2O,
Dielektrizitätskonstante $D = 6{,}1$ (25° C) .. 6,7 (300° C).

Für den Verlustwinkel $tg\,\delta(\lambda) = f(T\,°C)$ ergab sich für:

Schott-Supremax V 1565 III		Amerikanisches Pyrex-Glas		V 424 d		V 2877 III	
$\lambda = 14{,}1$ m		$\lambda = 15{,}1$ m		$\lambda = 15{,}1$ m		$\lambda = 15{,}1$ m	
T °C	tg δ	T °C	tg δ	T °C	tg δ	T °C	tg δ
25	$17{,}5.10^{-4}$	24	38.10^{-4}	24	60.10^{-4}	24	63.10^{-4}
80	18,4	50	44	40	64	80	85
102	19	73	48	80	79	101	97
134	19,5	106	56	101	90	122	110
184	22	123	65	155	137	153	140
207	23	164	84	184	175	173	165
226	24,5	186	95	207	215	194	200
247	26	206	114	227	256	215	240
263	27,4	226	134	247	305	238	300
284	30	250	164	279	399	279	405
295	31	279	210	295	445	305	484
308	33,5	301	245	309	490	315	523

Aus den Meßwerten erhält man demnach für:

T °C	Schott-Supremax V 1565 III	Amerikanisches Pyrex-Glas	V 424 d	V 2877 III
	$\lambda = 14{,}1$ m	$\lambda = 15{,}1$ m	$\lambda = 15{,}1$ m	$\lambda = 15{,}1$ m
	tg δ	tg δ	tg δ	tg δ
25	$17{,}5.10^{-4}$	38.10^{-4}	61.10^{-4}	63.10^{-4}
100	19	56	90	97
150	21	75	130	137
200	22	108	201	210
250	26	165	312	325
300	32	243	460	470

3. Bei der Wellenlänge von $\lambda = 19{,}0$ m bzw. $\lambda = 20{,}0$ m wurde der Verlustwinkel in Abhängigkeit von der Temperatur für folgende Gläser gemessen:

V 130 i, Ausdehnungskoeffizient $\alpha = 80 \,..\, 100.10^{-7}/°$ C,
Zusammensetzung, über 10 % SiO_2, Na_2O,
unter 10 % Al_2O_3, K_2O, CaO, CeO_2,
Dielektrizitätskonstante $D = 7{,}8$ (25° C) .. 9,5 (300° C);

Weißwasser-Supremax, V 671 g $\alpha = 32 \,..\, 50.10^{-7}/°$ C,
Zusammensetzung, über 10 % SiO_2, Al_2O_3,
unter 10 % B_2O_3, Na_2O, CaO, MgO,
Dielektrizitätskonstante $D = 6{,}3$ (25° C) .. 6,7 (300° C);

Weißwasser-Pyrex-Glas, V 394 b $\alpha = 32 \,..\, 50.10^{-7}/°$ C,
Zusammensetzung, über 10 % SiO_2, B_2O_3,
unter 10 % Al_2O_3, Na_2O, K_2O, CaO,
Dielektrizitätskonstante $D = 6{,}1$ (25° C) .. 6,8 (300° C);

V 1447 III, $\alpha = 32 \,..\, 50.10^{-7}/°$ C,
Zusammensetzung, über 10 % SiO_2, B_2O_3, ZnO,
unter 10 % Al_2O_3, Na_2O, K_2O, CaO,
Dielektrizitätskonstante $D = 6{,}1$ (25° C) .. 6,8 (300° C).

Für den Verlustwinkel $\mathrm{tg}\,\delta\ (\lambda) = f\,(T\,°\,C)$ ergab sich für:

V 130 i		Weißwasser Supremax V 671 g		Weißwasser Pyrex-Glas V 394 b		V 1447 III	
$\lambda = 20{,}0$ m		$\lambda = 20{,}0$ m		$\lambda = 19{,}0$ m		$\lambda = 19{,}0$ m	
T °C	tg δ	T °C	tg δ	T °C	tg δ	T °C	tg δ
25	40.10^{-4}	22	$34{,}7.10^{-4}$	25	57.10^{-4}	25	66.10^{-4}
48	50	65	42	68	72	50	77
75	66	101	48,3	93	85	70	85
103	92	139	57	113	100	95	97
129	120	160	61,4	134	121	122	120
153	161	182	67	156	141	164	158
178	206	200	72	174	166	202	220
205	258	229	80,5	194	197	233	284
231	335	260	96	217	227	254	330
253	390	283	107	240	267	274	384
279	465	298	118	277	327	298	454
304	537	306	122	299	368	307	474

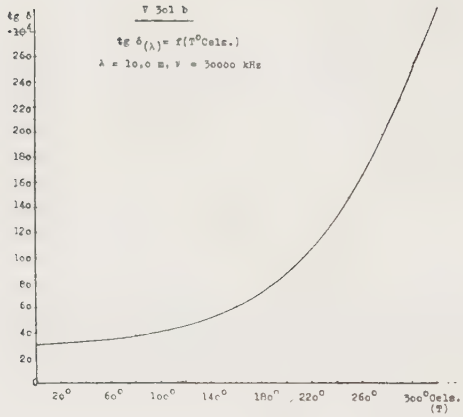
Aus den Meßwerten erhält man demnach für:

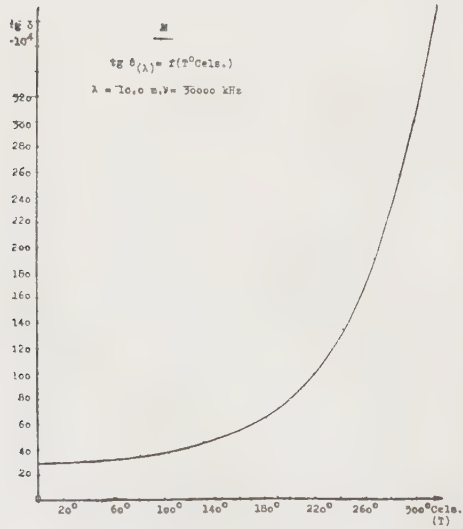
T °C	V 130 i	Weißwasser Supremax V 671 g	Weißwasser Pyrex-Glas V 394 b	V 1447 III
	$\lambda = 20{,}0$ m	$\lambda = 20{,}0$ m	$\lambda = 19{,}0$ m	$\lambda = 19{,}0$ m
	tg δ	tg δ	tg δ	tg δ
25	40.10^{-4}	35.10^{-4}	57.10^{-4}	66.10^{-4}
100	86	48	90	100
150	155	59	137	144
200	256	72	203	216
250	384	90	283	310
300	525	118	370	455

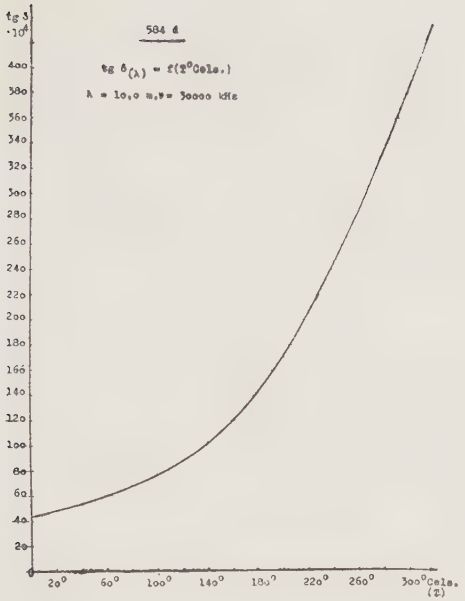
Dielektrizitätskonstanten und Verlustwinkel von Gläsern und Porzellan bei Zimmertemperatur.

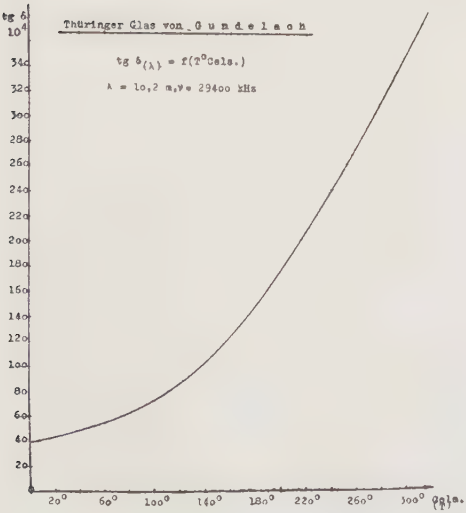
Material	D	tg $\delta \cdot 10^4$								
		$\lambda =$ 3 m	$\lambda =$ 6 m	$\lambda =$ 25 m	$\lambda =$ 30 m	$\lambda =$ 75 m	$\lambda =$ 100 m	$\lambda =$ 150 m	$\lambda =$ 300 m	
Quarzkristall	4,7		1,1		1,0		1,0		1,0	[1]
			1,7	1,6		1,6				[3]
Quarzglas	4,2	1,0	1,1			1,1				[4]
			1,7		1,7		1,8		1,8	[1]
Glimmer	7,0	1,6	1,6	1,6		1,6				[3] [4]
			1,7		1,7		1,7		1,7	[1]
Turmalin	6,0	3,0	2,9							[4]
Minosglas	7,5		7,4	5,9		5,0		4,8	4,6	[3]
Bleiglas	6,7	14	11			5,7				[4]
	(16,1)		10,6	7,2		5,7		5,5	5,3	[3] [5]
Mycalex	8—8,5		18	18	18	18	18	18	18	[1] [2] [3]
Quarzgut	3,8		27	14,8		8,6		6,7		[3]
	3,8		27	15		6,5		6,5		[2]
	3,9		7,0		5,8		5,5		5,2	[1]
	3,9	1,1	1,2							[4]
Tempax	6,5			28		28		28		[3]
ThüringerGlas	7,0	65	48							[4]
	7,1		48	34		38		42	47	[3]
Geräteglas	6,5	70	59							[4]
			59	63		67		73		[3]
Porzellan	5,4		85		63		49		55	[1]
	5,3		85	63		50		48	55	[3]

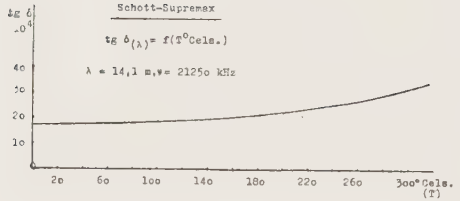
Nach Angaben von: [1]) Hescho A.G. [2]) Rohde. [3]) Rohde und Schlegelmilch. [4]) Rohde und Schwarz. [5]) Hänlein.

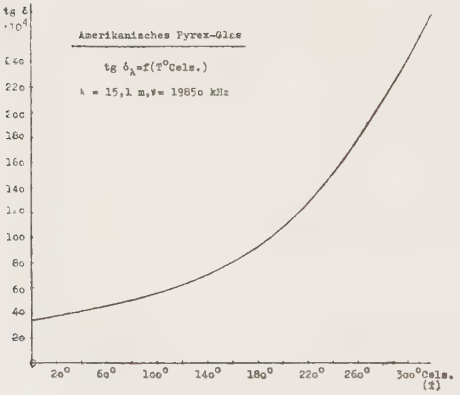

V 3o1 b
tg δ(λ)= f(T°Cels.)
λ = 1o,o m, ν = 3oooo kHz
tg δ ·10⁴
26o
24o
22o
2oo
18o
16o
14o
12o
1oo
8o
6o
4o
2o
0
2o°
6o°
1oc°
14c°
18o°
22o°
26o°
3oo°Cels.
(T)

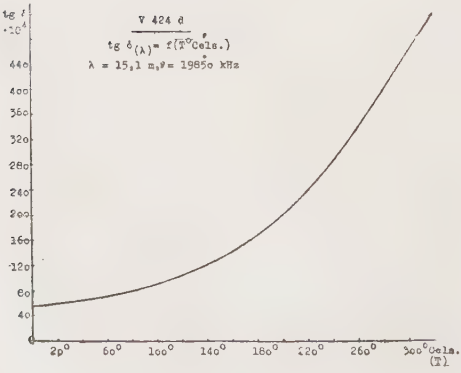

M
tg δ(λ)= f(T°Cels.)
λ = 1o,o m, ν = 3oooo kHz
tg δ ·10⁴
32o
3oo
28o
26o
24o
22o
2oo
18o
16o
14o
12o
1oo
8o
6o
4o
2o
0
2o°
6o°
1oo°
14o°
18o°
22o°
26o°
3oo°Cels.
(T)

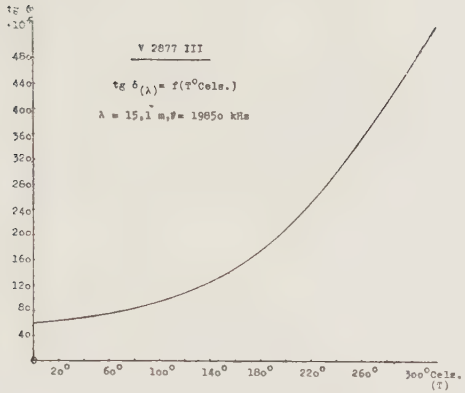

tg δ
·10⁴
584 d
tg δ(λ) = f(T°Cels.)
λ = 10,6 m, ν = 30000 kHz
400
380
360
340
320
300
280
260
240
220
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
20°
60°
100°
140°
180°
220°
260°
300° Cels.
(T)

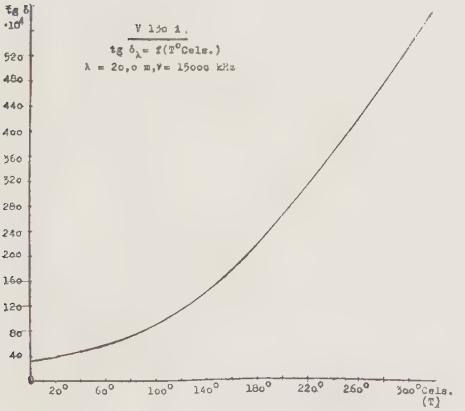

tg δ
10⁴
Thüringer Glas von G u m d e l a c h
tg δ(λ) = f(T°Cels.)
λ = 10,2 m, ν = 29400 kHz
340
320
300
280
260
240
220
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
20°
60°
100°
140°
180°
220°
260°
300°
(T)

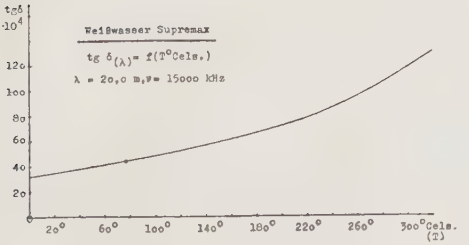

tg δ
Schott-Supremax
tg δ(λ)= f(T°Cels.)
λ = 14,1 m, ν= 21250 kHz
2o
6o
1oo
14o
18o
22o
26o
3oo°Cels.
(T)

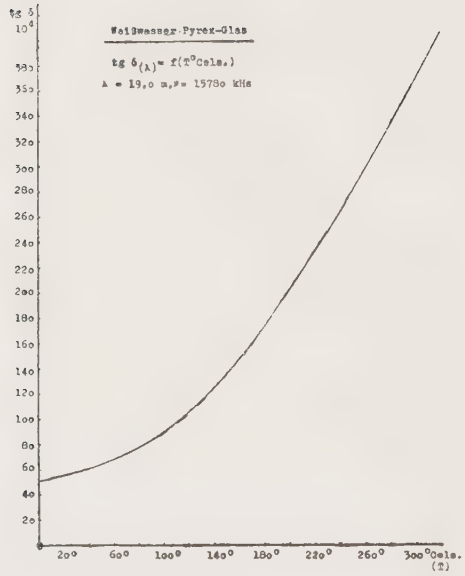

tg δ
Amerikanisches Pyrex-Glas
tg δλ=f(T°Cels.)
λ = 15,1 m, ν= 19850 kHz
2o°
6o°
1oo°
14o°
18o°
22o°
26o°
3oo°Cels.
(T)

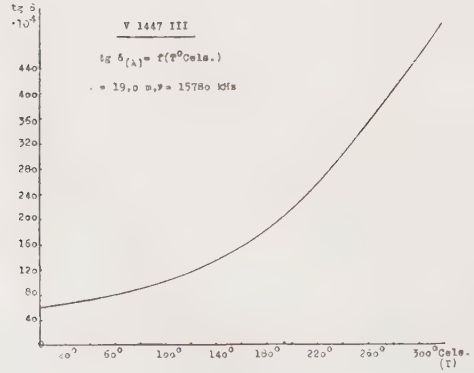

tg δ
V 424 d
tg δ(λ)= f(T°Cels.)
λ = 15,1 m, ν= 19850 kHz
2p°
6o°
1oo°
14o°
18o°
22o°
26o°
3oo°Cels.
(T)


V 2877 III
tg δ(λ)= f(T°Cels.)
λ = 15,1 m,ν= 1985o kHz
tg δ
·10⁴
480
440
400
360
320
280
240
200
160
120
80
40
20°
60°
100°
140°
180°
220°
260°
300°Cels.
(T)


V 13o i.
tg δλ= f(T°Cels.)
λ = 2o,o m,ν= 15ooo kHz
tg δ
·10⁴
520
480
440
400
360
320
280
240
200
160
120
80
40
20°
60°
100°
140°
180°
220°
260°
300°Cels.
(T)


Weißwasser Supremax
tg δ(λ)= f(T°Cels.)
λ = 2o,o m,ν= 15ooo kHz
tgδ
·10⁴
120
100
80
60
40
20
20°
60°
100°
140°
180°
220°
260°
300°Cels.
(T)


tg δ
10⁴
Weißwasser Pyrex-Glas
tg δ(λ) = f(T°Cels.)
λ = 19,0 m, ν = 15780 kHz
360
340
320
300
280
260
240
220
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
20°
60°
100°
140°
180°
220°
260°
300°Cels.
(T)


tg δ
·10⁴
V 1447 III
tg δ(λ) = f(T°Cels.)
λ = 19,0 m, ν = 15780 kHz
440
400
360
320
280
240
200
160
120
80
40
60°
100°
140°
180°
220°
260°
300°Cels.
(T)

Die vorliegende Arbeit wurde auf Anregung von Herrn Prof. Dr. H. Faßbender im Institut für Hochfrequenztechnik und Elektrische Schwingungslehre an der Technischen Hochschule Berlin durchgeführt.

Meinem verehrten Lehrer, Herrn Prof. Dr. Faßbender, sage ich für sein dauerndes Interesse und Wohlwollen sowie für die jederzeitige Förderung meiner Arbeit meinen herzlichsten Dank.

Auch gestatte ich mir, den Herren Prof. Dr. Wehnelt und Prof. Dr. E. Schumann für die freundliche Übernahme meiner Arbeit ergebenst zu danken.

Weiter danke ich Herrn Präsidenten Peglow vom Reichspostzentralamt Berlin und Herrn Regierungsrat Dr. Zickner von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt Berlin für ihre wertvollen Ratschläge und freundliche Überlassung von Meßinstrumenten.

Den Firmen Osram-Berlin, Steatit-Magnesia A.G.-Berlin, Hescho-Hermsdorf (Thür.) und der Fa. Dipl.-Ing. F. Janssen-Berlin danke ich für die zur Verfügung gestellten Untersuchungs- und Baumaterialien sowie Cekas-Chromnickel-Drähten.

VI. Schrifttum.

1. Landolt-Börnstein: Physikalische und Chemische Tabellen.
2. Stavenhagen, A.: Kurzes Lehrbuch der anorganischen Chemie (1922).
3. Wagner u. Wertheimer: Physikal. Ztschr. 1912, S. 369.
4. Fulda M.: Diss. Greifswald 1927.
5. „Hütte" 26. Aufl.
6. Simon u. Suhrmann: Lichtelektrische Zellen, 1932, S. 60 ff.
7. Kohlrausch, F.: Lehrbuch der praktischen Physik. 16. Aufl.
8. Hänlein, W.: Elektrotechn. Ztschr. 1933, Heft 23, S. 60 ff.
9. Henniger, K. A.: Lehrbuch der Chemie und Mineralogie, 7. Aufl.
10. Ullmann, F.: Enzyklopädie der technischen Chemie, Bd. 5, 2. Aufl., S. 738 ff.
11. Schwandt, E.: Keramische Baustoffe für die Hochfrequenztechnik. 1933.
12. Schott, E.: Jahrb. d. drahtl. Telegr. u. Teleph., 1921, Bd. 18, S. 82 ff.
13. Offermann, E.: Jahrb. d. drahtl. Telegr. u. Teleph., 1925, Bd. 26, H. 6.
14. Möller: Archiv f. Elektrotechn., 1925, Bd. 15, H. 1.
15. Keller, F.: Ztschr. f. techn. Phys., 1933, H. 3.
16. Lyons, Cl. L.: J. of. Sc. Instr. (Cambridge Univ. Press. Ldn.) Vol. V. 1928, S. 155 ff., 188 ff.
17. Behr, L. and Williams, A. J.: Procdgs. of the Inst. of Radio Eng. Vol. 20. Nr. 6, June 1932.
18. Hikoo Saegusa and Kiyosi Nakamura: The Sc. Rpts. of the Tôhoku Imp. Univ., First Series, Sendai, Japan, Vol. XXI. 1932, S. 424 ff.
19. Westphal, W.: Physik, 2. Aufl. 1930.
20. Behn, F. W.: Der Kurzwellensender, 1933.
21. Formeln und Tabellen zur Berechnung von Widerstandsdrähten aus Chromnickelmaterial, Marke „Cekas", C. Kuhbier u. Sohn, Dahlerbrück.
22. Küpfmüller, K.: „Vorträge auf d. 9. Deutschen Physiker- u. Mathematikertag 1933." Vlg. J. A. Barth, Lpzg., S. 15 ff.
23. Rohde, L., ebendort, S. 48 ff.
24. Müller, E. u. Zinke, O.: Hochfrequenztechn. u. Elektroakustik. Bd. 43, 1934, H. 5, S. 145 ff.
25. Rohde, L. u. Schwarz, H.: ebendort, S. 156.
26. Angerer, E. von: Technische Kunstgriffe bei physikalischen Untersuchungen. 1928.
27. Banneitz, F.: Taschenbuch der drahtlosen Telegraphie und Telephonie. 1927.
28. Graetz, L.: Die Elektrizität. 18. Aufl.
29. Joos, G.: Lehrbuch der theoretischen Physik. 1932.
30. Rohde, L. u. Schwarz, H.: Funk, 1934, H. 8, S. 145 ff.
31. Herrmann, I.: Die elektrischen Meßinstrumente (Sammlung Göschen). 1927.
32. Jaeger, W.: Elektrische Meßtechnik. 2. Aufl.
33. Wagner, K. W.: Arch. Elt. 3. 67. 1914.

Lebenslauf.

Als Sohn des jetzigen Oberpostinspektors Sören Petersen wurde ich, Werner Sören Andreas Petersen, evangelischer Konfession, am 14. Juli 1910 in Flensburg (Schleswig-Holstein) geboren. Ich besuchte in Trier das „Hindenburg-Realgymnasium", an dem ich Ostern 1930 die Reifeprüfung bestand. Anschließend widmete ich mich an der Universität Berlin und an der Technischen Hochschule Berlin dem Studium der Naturwissenschaften. Meine Studienfächer waren Physik, Chemie, Mathematik, Geographie und Geophysik. Dazu kamen noch chem. Technologie, Geologie und Mineralogie. Zur Vertiefung meiner Kenntnisse unternahm ich verschiedene Reisen in Deutschland, nach den west- und nordeuropäischen Staaten und den nord- und mittelamerikanischen Ländern. Zu Anfang des Jahres 1933 begann ich mit vorliegender Dissertation, die Ende 1934 fertiggestellt wurde.